

# 太湖流域河蟹不同生长期池塘养殖场氮磷动态变化研究

季 铭<sup>1,2</sup>, 闫兴成<sup>1,2</sup>, 许晓光<sup>1,2</sup>, 张重乾<sup>1,2</sup>, 冉珊珊<sup>1,2</sup>, 王国祥<sup>1,2</sup>, 孙 丽<sup>3</sup>

(1.南京师范大学环境学院,江苏 南京 210023)

(2.江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,江苏省环境演变与生态建设重点实验室,  
江苏省水土环境生态修复工程实验室,江苏 南京 210023)

(3.无锡市滨湖区水利局,江苏 无锡 214071)

**[摘要]** 为了解河蟹池塘养殖场水体及底泥中氮、磷动态变化规律,减少对周边水域的污染,选取太湖流域典型河蟹养殖场,监测水体及底泥中氮、磷周年动态变化。结果表明,河蟹养殖场水体氮、磷浓度在第 5 次蜕壳期(7—8 月)最低,育肥期(9—10 月)最高,底泥中氮、磷负荷育肥期最高,捕捞季最低。育肥期养殖塘水体 TN、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 劣于国家地表水环境质量标准 V 类水标准,捕捞季 TN 和 TP 超出太湖流域池塘养殖水排放标准一级标准。建议合理设置蟹苗投放量,加强日常管理,重点关注育肥期池塘水质的控制。

**[关键词]** 河蟹养殖,水质,底泥,动态特征,氮磷污染

**[中图分类号]** X52 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2020)04-0129-06

## Study on the Dynamic Changes of Nitrogen and Phosphorus from Pond Farms in Different Growth Stages of Crab in Taihu Lake Basin

Ji Ming<sup>1,2</sup>, Yan Xingcheng<sup>1,2</sup>, Xu Xiaoguang<sup>1,2</sup>, Zhang Zhongqian<sup>1,2</sup>,  
Ran Shanshan<sup>1,2</sup>, Wang Guoxiang<sup>1,2</sup>, Sun Li<sup>3</sup>

(1.School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Jiangsu Engineering Laboratory of Water and Soil Eco-remediation, Nanjing 210023, China)

(3.Water Conservancy Bureau of Binhu District in Wuxi City, Wuxi 214071, China)

**Abstract:** In order to understand the dynamic changes of nitrogen and phosphorus in the water body and sediments of crab farming ponds and reduce the pollution to the surrounding waters, a typical crab farm in Taihu Lake Basin was selected to monitor these parameters. The results showed that the concentration of nitrogen and phosphorus was the lowest during the fifth shelling period (July–August) and the highest during the fattening period (September–October). The load of nitrogen and phosphorus in sediments was the highest in the fattening period and the lowest in the fishing season. The TN, TP and NH<sub>3</sub>-N concentrations of pond waters during the fattening period were inferior to the Class V water standards of the National Surface Water Environmental Quality Standard, and the TN and TP during the fishing season exceeded the first-level standard of the Discharge Requirements of Pond Aquaculture Water in Taihu Lake Basin. It is recommended to set the reasonable amount of crab seedlings, and strengthen the daily management, and pay attention to the control of pond water quality during the fattening period.

**Key words:** crab farming, water quality, sediment, dynamic characteristics, nitrogen and phosphorus pollution

近年来,我国水产养殖业发展十分迅速。河蟹,学名中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*),因其营养丰富、味道鲜美、适应性较强,养殖规模迅速扩大,养殖产量从 2000 年的 23.24 万 t 增加到了 2017 年的 75.09 万 t<sup>[1]</sup>。洪泽湖流域河蟹更是取代鱼类成为主要的水产品<sup>[2]</sup>。养殖产量的提升,导致含有残饵、排泄物等污染物的养殖尾水排放量剧增<sup>[3]</sup>。氮、磷是水产养殖区水体的主要污染物<sup>[4]</sup>。研究表明,投喂饲料中 70% 的氮、磷养分通过各种形式进入周边水体<sup>[5]</sup>。以江苏溧阳为例,渔业养殖是溧阳市主要的水污染源,其排放的总氮和总

收稿日期:2020-05-19.

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-003)、江苏省太湖水环境综合治理科研项目(TH2015202)。

通讯作者:王国祥,博士,教授,博士生导师,研究方向:环境生态与生态修复。E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

磷占溧阳市排放总量的 14.92% 和 40.83%, 且排放贡献率有逐年增加的趋势<sup>[6]</sup>. 这些富含氮、磷的养殖废水的排放, 加剧了湖库的富营养化.

池塘养殖是河蟹养殖的一种主要养殖形式,目前关于其氮、磷污染方面已有不少研究,包括氮、磷在养殖水体及底泥中的时空分布<sup>[7-9]</sup>、氮、磷收支<sup>[10-12]</sup>、不同地区河蟹养殖塘污染排放强度<sup>[13-16]</sup>等.此外,还有学者对河蟹养殖池塘氮、磷的影响因素进行了探究,如戴修赢等<sup>[17]</sup>研究了3种饵料结构对河蟹养殖池塘氮、磷污染强度的影响.为控制河蟹养殖塘氮、磷的输出,对于河蟹的池塘生态养殖模式也开展了相关研究<sup>[18-19]</sup>.这些研究大多针对河蟹养殖排水时期进行研究,对于河蟹整个生长周期养殖塘的水和底泥中氮、磷的动态变化特征研究较少.调节水质是保证河蟹健康成长的前提,直接关系到养殖的成败,同时也影响到整个流域污染物的排放.因此,充分了解水产养殖过程中水质变化规律、主要影响因素及调节方法对控制和管理区域面源污染具有重要意义.

太湖流域是我国河蟹养殖的主要区域,据调查,太湖流域池塘连片养殖场共 11.1 万  $\text{hm}^2$ , 6.7  $\text{hm}^2$  以上的养殖塘有 1 543 个,共 3.4 万  $\text{hm}^2$ ,其中 2/3 为河蟹养殖场<sup>[20]</sup>. 因此本文选取太湖流域典型河蟹池塘养殖场,监测分析河蟹养殖过程中养殖水体及底泥氮、磷动态变化特征,旨在通过探究河蟹不同生长期氮、磷变化影响因素,更加经济高效地控制河蟹养殖场水质,减少对周边水体的氮、磷输出.

## 1 研究区概况

研究区位于江苏省常州市前黄镇高梅村,养殖场总面积  $7.3 \text{ hm}^2$ , 现有养殖池塘 6 个, 各养殖池塘命名如图 1, 其中 C 塘和 F 塘连通。蟹苗在 3 月初投放, 投放量约为  $22\,500 \text{ 只/hm}^2$ 。饲料主要有玉米、颗粒饲料及冰鲜小杂鱼, 其中小杂鱼主要在 3—4 月及 9—11 月投放, 其余时期以颗粒饲料和玉米为主, 各月饲料投放比重情况如表 1。养殖塘内主要种植伊乐藻, 盖度约 60%。2—5 月养殖塘水位维持在  $40\sim 50 \text{ cm}$ , 5 月后水位逐步上升, 7—8 月维持在  $1.2 \text{ m}$  左右, 9—10 月维持在  $1 \text{ m}$  左右, 养殖过程中不换水、不排水, 只补水。养殖过程中逐塘捕捞, 逐塘清塘, 12 月完成所有养殖塘的捕捞工作。常州市属亚热带季风气候, 四季分明, 雨热同期, 气温及降雨量具体情况见图 2。

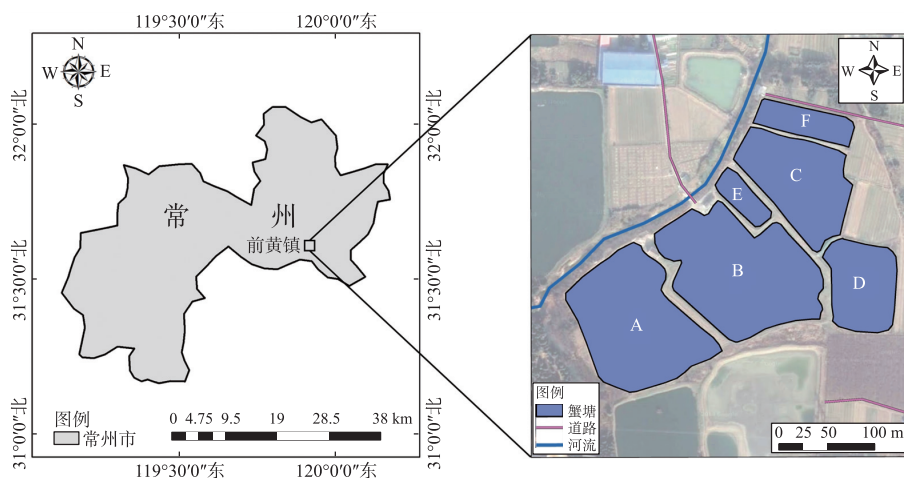


图 1 研究区

**Fig. 1 Research area**

表 1 各月饲料投放占全年投放量比重

**Table1** The amount of feed put in each month accounted for the proportion of the annual volume

月份	占比/%	月份	占比/%
1	0	7	16
2	0	8	18
3	2	9	22
4	5	10	12
5	10	11	1
6	14	12	0

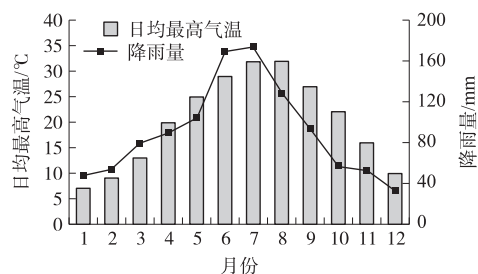


图2 常州市各月天气情况

**Fig. 2 The monthly weather in Changzhou**

2 数据来源与研究方法

对 5 个养殖塘(C 塘和 F 塘因为连通视为 1 个养殖塘)进行 1 个养殖周期(2016 年 2 月—2016 年 12 月)的连续调查. 调查参数包括水中 TN、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、硝氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和 TP,底泥中 TN、TP 和总有机碳(TOC). 水样采用有机玻璃采水器在水面下 50 cm 处采集,底泥样品采用彼得森采泥器采集.

水中 TN 采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法(GB 11894—89)测定,TP 采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)测定,水样经 0.45 μm 滤膜过滤后采用连续流动分析仪(Auto Analyzer 3,德国)测定水中 NH<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N. 底泥中 TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法进行测定<sup>[21]</sup>,TP 采用 SMT 法<sup>[22]</sup>提取,提取后用钼锑抗分光光度法测定,TOC 用 TOC 分析仪(耶拿 multi N/C 3100 & HT 1300,德国)测定.

3 结果与讨论

3.1 不同河蟹生长期养殖塘水体氮、磷动态变化特征

河蟹养殖塘水体氮、磷周年变化趋势如图 3 所示. 养殖塘水中 TN、TP 波动较大,TN 浓度变化范围为 0.62~5.33 mg/L,TP 浓度变化范围为 0.04~0.56 mg/L. 养殖塘水体 TN、TP 浓度在较长的一段时期内超出地表水环境质量标准 V 类标准(表 2).

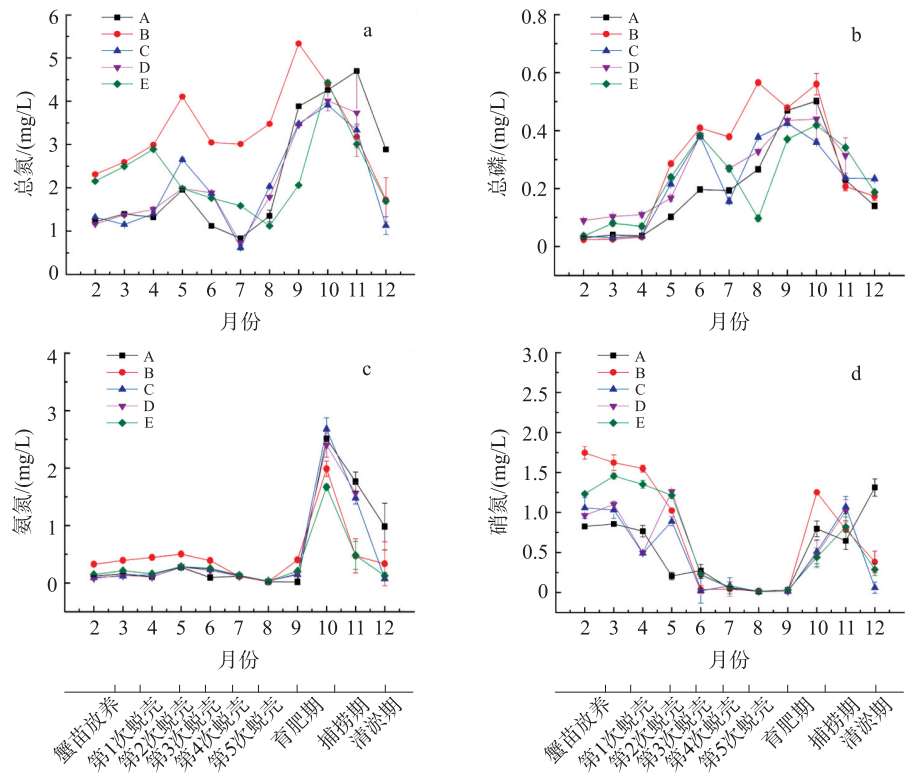


图 3 养殖塘水体氮、磷变化趋势图

Fig. 3 The variation trend of N and P in water of crab farming ponds

表 2 水质标准基本项目标准限值

Table 2 Limits for basic items of water quality standards

mg/L

水质标准	总氮	氨氮	总磷
地表水环境质量标准Ⅲ类	≤1.0	≤1.0	≤0.2
地表水环境质量标准Ⅴ类	≤2.0	≤2.0	≤0.4
太湖流域池塘养殖水排放标准一级	≤2.0	≤1.5	≤0.3
太湖流域池塘养殖水排放标准二级	≤3.0	≤2.0	≤0.4

河蟹育肥期(9—10 月)是水体 TN、TP 的主要上升时期,TN、TP 分别从 1.95、0.33 mg/L 上升至 4.20、0.46 mg/L. 在捕捞季(10—12 月)排水过程中,前期水中 TN、TP 超出太湖流域池塘养殖水排放标准(表 2),随着河蟹的捕捞,水中 TN、TP 逐渐下降,12 月时可达太湖流域池塘养殖水排放标准一级标准. 河

蟹育肥期之前水中氮以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  为主,水中  $\text{NH}_3\text{-N}$  保持在  $0.02 \sim 0.50 \text{ mg/L}$  之间,可达地表水环境质量标准 II 类水标准( $\text{NH}_3\text{-N} \leq 0.50 \text{ mg/L}$ ). 在育肥期, $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度大幅上升,平均值从 8 月的  $0.03 \text{ mg/L}$  上升到 10 月的  $2.25 \text{ mg/L}$ .

3.2 不同河蟹生长期养殖塘底泥氮、磷含量动态变化特征

河蟹养殖塘底泥中 TN、TP 含量大体呈现先上升后下降的变化趋势,如图 4 所示. 底泥中 TN 初始平均值为  $1\,041.30 \text{ mg/kg}$ ,在 6—10 月养殖塘底泥中 TN 含量较高,在  $1\,579.17 \sim 2\,431.58 \text{ mg/kg}$  之间,约是初始值的 2 倍,12 月时养殖塘底泥中 TN 最低,平均值为  $982.37 \text{ mg/kg}$ . 5 个养殖塘初始 TP 平均值为  $768.59 \text{ mg/kg}$ ,10 月时底泥中 TP 含量最高,平均值为  $1\,119.92 \text{ mg/kg}$ ,是初始值的  $1.12 \sim 2.07$  倍,12 月时最低,5 个养殖塘底泥 TP 平均值为  $679.31 \text{ mg/kg}$ .

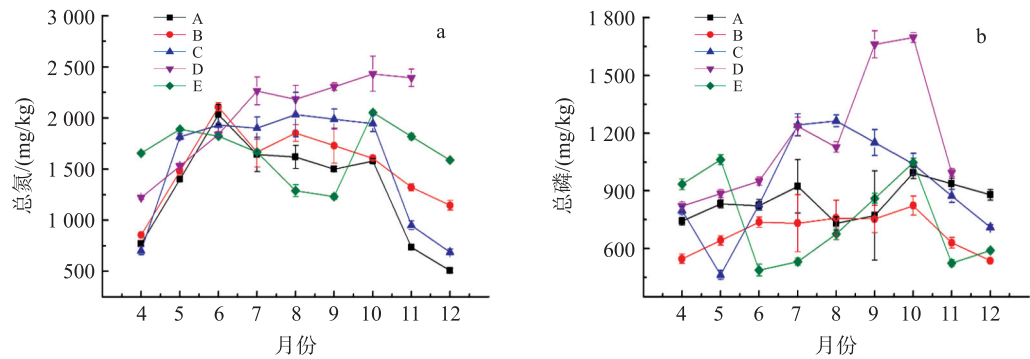


图 4 养殖塘底泥总氮、总磷变化趋势图

Fig. 4 The variation trend of TN and TP in sediments of crab farming ponds

3.3 河蟹养殖塘水体与底泥氮、磷变化的影响因素

各地区河蟹养殖因养殖密度、水草种类及盖度、饲料种类及搭配、补水换水频率的不同,在养殖过程中水体氮、磷浓度存在一定区别,但其变化趋势存在一定共性,大多表现为养殖前期水质较好,育肥期水体氮、磷浓度明显上升,养殖尾水氮、磷浓度相对前期较高. 如表 3 所示,各地河蟹养殖塘排水 TN 浓度在  $0.98 \sim 5.48 \text{ mg/L}$ ,大部分养殖塘排水 TN 浓度低于  $2 \text{ mg/L}$ ,个别养殖塘排水 TN 浓度超出太湖流域池塘养殖水排放标准二级标准(表 2). 各地河蟹养殖塘排水 TP 浓度在  $0.07 \sim 0.39 \text{ mg/L}$ ,均能达到太湖流域池塘养殖水排放标准二级标准,但部分养殖塘 TP 超出一级排放标准. 与其他研究相比,本研究养殖尾水中氮含量较高, $\text{TN}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量均高于其他河蟹养殖塘. 河蟹池塘养殖在育肥期塘内氮、磷有一定的上升,使得在捕捞季进行排水时水体氮、磷浓度有超出太湖流域池塘养殖水排放标准的风险,因此需要重点关注河蟹池塘养殖育肥期及捕捉季水质.

表 3 各地区河蟹养殖塘排水氮、磷情况

Table 3 N and P concentrations in the tail water of crab farming ponds in various regions						
地区	养殖品种	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg/L})$	$\text{NO}_3^-\text{-N}/(\text{mg/L})$	参考文献
洪湖	河蟹	1.72	0.280	—	—	[7]
上海	河蟹	0.98	0.310	0.33	0.49	[23]
宜兴	河蟹	1.59	0.070	0.38	0.06	[24]
金坛	河蟹	1.77	0.130	0.41	—	[25]
桂林	河蟹	5.48	0.009	2.15	0.08	[26]
高淳	河蟹	1.85	0.220	0.15	—	[27]
苏州	河蟹、青虾	1.58	0.230	0.70	—	[10]
苏州	河蟹、青虾	1.31	0.190	—	—	[14]
宜兴	河蟹、青虾、鳊鱼等	2.65	0.180	0.72	0.21	[28]
上海	河蟹、青虾、鲢等	3.09	0.390	0.29	0.07	[29]
金坛	河蟹、青虾、塘鳢	1.63	0.140	0.40	—	[25]
常州	河蟹	3.59	0.270	1.15	0.87	本研究

养殖塘水及底泥中氮、磷主要受到养殖密度、饲料、水草、螃蟹活动及补水情况等因素影响. 研究表明,饲料是池塘养殖环境中氮、磷的主要来源<sup>[13]</sup>. 养殖期间,为保证河蟹的生长,饲料投加量往往会过量,并以残饵



的形式留存在养殖塘中,而残饵会向水体释放大量的氮磷<sup>[10]</sup>。如图 3(a)、(b)所示,在蟹苗投放后至第 3 次蜕壳期养殖塘水体 TN、TP 有明显的上升,主要是由于该阶段饲料投加量随着河蟹个体的增长而增加。育肥期是河蟹积累营养的重要时期,为满足河蟹生长育肥需要,这一阶段饲料投放量在全年占比中最高,约占整个养殖过程的四分之一(表 1),该时期投放饲料以冰鲜小杂鱼为主,冰鲜小杂鱼在水中营养成分溶失率和腐蚀性较高<sup>[30]</sup>,导致在育肥期养殖塘水体水质较差。饲料投加量与养殖密度息息相关,养殖密度越高,饲料投加量也相应越高。本研究蟹苗投放量在河蟹单养及蟹虾混养池塘中较高,为 22 500 只/hm<sup>2</sup>,与戴丹超等研究的养殖塘蟹苗投放量相同,二者排水 TN 浓度均高于 2 mg/L,而表 3 中除桂林地区外,蟹苗投放量在 7 500~15 000 只/hm<sup>2</sup> 的河蟹养殖场排水 TN 浓度均低于 2 mg/L,因此,可以表明养殖密度过大会使得养殖塘水体氮、磷较高。

养殖塘水质不仅受饲料的影响,还与水草有较大关系,养殖塘中的水草可以调节改善养殖塘水质及养殖生态环境<sup>[31]</sup>。本研究养殖塘中种植伊乐藻,在伊乐藻生长较好的 6—8 月份养殖塘水中氮、磷较低(图 3)。9 月,伊乐藻开始衰落,同时为了提高育肥期河蟹活动量,对养殖塘内伊乐藻进行了清除。在缺少伊乐藻调节改善水质的作用后,养殖塘内又投入了大量的饲料,养殖塘内水质迅速恶化,水中 NH<sub>3</sub>-N 浓度由 0.19 mg/L 升至 2.25 mg/L。不同的栽种模式及种类搭配对池塘水质的改善作用效果存在差异,伊乐藻与轮叶黑藻混合搭配栽培模式对池塘水质改善、生态调节的作用明显优于单一水草栽培模式<sup>[31]</sup>。表 3 中河蟹养殖塘中多选用复合水草种植模式,本研究养殖塘为伊乐藻单一种植模式,这可能也是使得本研究排水氮、磷较高的一个原因。

除去饲料与水草对养殖塘水中氮、磷有影响外,补水与换水也对水体氮、磷有较大影响<sup>[32]</sup>。由图 2 可知,在河蟹第 4 次至第 5 次蜕壳期,高温多雨,大量雨水汇入养殖塘,同时高温导致水体大量蒸发,为保证养殖塘水位,会向养殖塘补水,雨水及补水稀释了养殖塘水中的氮、磷,所以即使这一时期饲料投加量较高,水中氮、磷仍维持在较低值。在补水与换水过程中,各地养殖塘多利用周边水源,因此,水源区水质情况对养殖塘水质也有较大影响。桂林地区的河蟹养殖塘虽然也采用生态养殖模式,且蟹苗投放量仅为 9 000 只/hm<sup>2</sup>,但因水源水 TN 与 NH<sub>3</sub>-N 含量偏高,致使排水中 TN 与 NH<sub>3</sub>-N 在表 3 养殖塘中偏高。表 3 中其余排水氮、磷超出太湖流域池塘养殖水排放标准的养殖塘也存在水源氮、磷较高的情况。此外,河蟹本身也会对水体氮、磷产生影响,包括排泄物中氮、磷的释放,河蟹活动对底泥的扰动<sup>[10]</sup>。

底泥氮、磷变化主要受残饵、河蟹排泄和水生植物的影响。田功太等<sup>[33]</sup>研究发现,高等水生植物与底栖动物对河蟹养殖地质有明显的净化效果。本研究养殖前期,养殖塘中伊乐藻尚未栽种,在残饵及河蟹排泄物的影响下,底泥 TN、TP 含量逐步上升。在第 3 次蜕壳期至育肥期,因为伊乐藻对氮、磷的吸收,氮、磷含量不再继续上升。进入捕捞期后,养殖塘内河蟹数量及饲料投放量不断减少,底泥中氮、磷开始逐渐降低。

## 4 结论

以太湖流域一河蟹池塘养殖场为研究对象,针对一个养殖周期内水体 TN、TP、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 及底泥 TN、TP 进行了监测分析。监测结果表明河蟹池塘养殖场水体氮、磷浓度在第 5 次蜕壳期最低,在育肥期最高;底泥中 TN、TP 呈现前期和末期低,养殖中期高的变化特征。育肥期养殖塘水体 TN、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 劣于地表水环境质量标准 V 类水标准。捕捞季排放尾水时 TN 和 TP 超出太湖流域池塘养殖水排放标准。

合理设置蟹苗投放量,科学养殖,加强日常管理。过大的养殖密度会使得在养殖过程中单位面积的饲料投放量增加,从而增加氮、磷的输入。与此同时,养殖过程中水草管理十分重要,水草能够有效地控制养殖塘内氮、磷,水草一旦没有管理好,会使得养殖塘水质恶化。育肥期水质的控制尤为重要,育肥期水质会直接影响养殖尾水氮、磷含量。

改善养殖废水排水方式,控制底泥氮、磷含量。捕捞季(10—12 月)水体氮、磷浓度有明显的下降,可改善排水方式,或将养殖尾水静置一段时间后再排水,这样水体中的一部分氮、磷可以沉降到底泥中,尾水中的氮、磷浓度会相应下降,人工湿地等净化系统对养殖尾水也有较好的净化效果。养殖塘底泥氮、磷释放也是水体氮、磷的一个来源,对底泥氮、磷的控制也十分重要,因此,需要在干塘期间对底泥进行处理,减少底泥氮、磷及有机质含量。

## [参考文献]

- [1] 孙林,李书民. 中国渔业统计年鉴 2018[M]. 北京:中国农业出版社,2018:208.
- [2] WANG Q,LIU J,ZHANG S,et al. Sustainable farming practices of the Chinese mitten crab(*Eriocheir sinensis*) around Hongze Lake,lower Yangtze River Basin,China[J]. *Ambio*,2016,45(3):361-373.
- [3] 陈秋会,席运官,刘明庆,等. 中国淡水水产养殖业排污分区初步研究[J]. *环境科学与技术*,2017,40(11):149-155.
- [4] 刘乾甫,赖子尼,杨婉玲,等. 珠三角地区密养淡水鱼塘水质状况分析与评价[J]. *南方水产科学*,2014,10(6):36-43.
- [5] 薛飞,周维仁,徐为民. 鱼类氮、磷营养与水体环境[J]. *河北渔业*,2004(3):1-3.
- [6] 黄振旭,陈昱,周涛,等. 溧阳重点流域污染源解析研究[J]. *水资源研究*,2016,5(1):59-64.
- [7] 邓楚洲,戴捷,李传岭,等. 四湖流域河蟹半封闭池塘养殖污染特征研究[J]. *环境科学与技术*,2009,32(专刊):51-59.
- [8] 戴捷,李传岭,邓楚洲,等. 洪湖流域半封闭池塘河蟹养殖氮磷污染负荷研究[J]. *环境科学与技术*,2010,33(5):169-172.
- [9] 孙振中,刘金金,张玉平. 上海市淡水养殖水体中氮、磷的分布研究[J]. *水产科学*,2018,37(4):512-521.
- [10] 宋学宏,郭培红,孙丽萍,等. 苏州市东山镇池塘养蟹面源污染现状及控制[J]. *水资源保护*,2011,27(1):63-66.
- [11] 戴修赢. 苏州地区七种养殖池塘水质及其氮、磷收支研究[D]. 苏州:苏州大学,2010.
- [12] 陈东兴. 5种养殖池塘水质、污染物排放强度及氮、磷收支[D]. 上海:上海海洋大学,2012.
- [13] 陈家长,胡庚,瞿建宏,等. 太湖流域池塘河蟹养殖向太湖排放氮磷的研究[J]. *农村生态环境*,2005,21(1):21-23.
- [14] 周露洪,谷孝鸿,曾庆飞,等. 江苏省固城湖围垦区池塘河蟹生态养殖效益及污染输出分析[J]. *湖泊科学*,2013,25(3):406-413.
- [15] 陈东兴,蔡春芳,华雪铭,等. 鱼、虾、蟹养殖池塘清塘排水水质及污染强度[J]. *淡水渔业*,2015,45(1):30-34.
- [16] 任黎华,宣引明,蒋明,等. 昆山地区典型池塘虾蟹混养模式对水环境的影响[J]. *水产养殖*,2017,38(1):15-20.
- [17] 戴修赢,蔡春芳,徐升宝,等. 饵料结构对河蟹养殖池塘氮、磷收支和污染强度的影响[J]. *水生态学杂志*,2010,31(3):52-56.
- [18] 周翔. 循环水池塘养殖系统氮磷污染特征研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [19] 吴凯,马旭洲,王友成,等. 池塘河蟹生态养殖对水环境的影响[J]. *上海农业学报*,2016,32(6):69-74.
- [20] CAI C,GU X,YE Y,et al. Assessment of pollutant loads discharged from aquaculture ponds around Taihu Lake,China[J]. *Aquaculture research*,2013,44(5):795-806.
- [21] 钱君龙,张连弟,乐美麟. 过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷[J]. *土壤*,1990,22(5):258-262.
- [22] RUBAN V,LÓPEZ-SÁNCHEZ J F,PARDO P,et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments: a synthesis of recent works[J]. *Fresenius journal of analytical chemistry*,2001,370(2/3):224-228.
- [23] 吴凯. 中华绒螯蟹生态养殖对水质影响的探究[D]. 上海:上海海洋大学,2016.
- [24] 吴伟,范立民,瞿建宏,等. 池塘河蟹生态养殖对水体环境的影响[J]. *安全与环境学*,2006,6(4):52-56.
- [25] 刘伟杰,吴健伟,张跃东,等. 河蟹、青虾、塘鳢混养和单养池塘水质变化比较[J]. *水产养殖*,2014,35(4):16-20.
- [26] 孙文通,唐春,马旭洲,等. 桂林地区池塘生态养蟹水环境及河蟹生长初探[J]. *水产科技情报*,2015,42(5):262-267.
- [27] 陆健,王绍绵,肖飞,等. 高淳地区河蟹养殖对水环境主要污染指标的影响[J]. *水产养殖*,2018,39(6):7-9.
- [28] 戴丹超,马旭洲,张勇,等. 宜兴溇湖地区河蟹生态养殖池塘对水环境的影响[J]. *环境化学*,2019,38(11):2573-2582.
- [29] 王高龙,马旭洲,王武,等. 上海松江泖港地区成蟹养殖对水质的影响[J]. *安全与环境学报*,2016,16(3):299-304.
- [30] 欧阳喆,丁玉庭,雷中芸,等. 颗粒饲料的水中保形和致腐性评价研究[J]. *饲料工业*,2005,26(24):29-34.
- [31] 徐增洪,刘国锋,水燕,等. 人工栽培水草对池塘养殖生态环境和虾蟹生长的影响[J]. *江苏农业科学*,2016,44(6):328-331.
- [32] 丁惠明,沈彩娟,陈雯,等. 池塘养殖换水目的和水质状态对换水频率的影响[J]. *生态与农村环境学报*,2019,35(6):781-786.
- [33] 田功太,许国晶,李壮,等. 高等水生植物与底栖动物对中华绒螯蟹养殖底质环境的协同净化效果[J]. *江苏农业科学*,2019,47(12):212-215.

[责任编辑:丁 蓉]